

文章编号: 1008 - 2786 - (2018)2 - 280 - 09

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000323

# 干湿循环作用下云南红土特性与库岸边坡 稳定性关系研究

张祖莲, 梁谏杰, 黄英, 邱观贵, 袁强

(昆明理工大学 电力工程学院, 昆明 650500)

**摘 要:** 研究干湿循环作用下云南红土特性变化对库岸边坡稳定性的影响, 对深入认识不同岩土体库岸边坡失稳机理有重要意义。通过红土试样的干湿循环试验, 结合土工试验、数值计算及理论分析进行研究。结果表明: 1) 在一定初始干密度条件下, 干湿循环作用使红土的粘粒含量呈先增大后减小, 然后趋于稳定的变化趋势, 而粉粒含量的变化趋势则与之相反。随着干湿循环次数的增加, 干密度呈先增加后趋于稳定的变化趋势。2) 在一定初始干密度条件下, 红土的粘聚力、内摩擦角、抗剪强度及红土型库岸的稳定安全系数均随干湿循环次数的增加而非线性减小, 但在干湿循环次数约 10 次时趋于稳定。红土抗剪强度、粘聚力和内摩擦角对红土型库岸边坡稳定有显著影响。以上结论可为防范和治理云南红土型库岸边坡失稳提供参考。

**关键词:** 红土; 粘聚力; 内摩擦角; 抗剪强度; 稳定安全系数

**中图分类号:** P642.2; X43

**文献标志码:** A

库岸岩土体性质是影响库岸边坡稳定性的内在因素。库水浸泡及水位反复升降, 引起库岸岩土体物理力学性质、库岸边坡荷载、水文地质条件发生相应变化, 对库岸边坡稳定性、失稳模式等产生影响<sup>[1-3]</sup>。现有库岸稳定性研究大多集中在库水位升降导致库岸边坡力学效应变化对库岸稳定性的影响方面, 认为水库水位涨落对库岸边坡稳定性有着显著影响, 且蓄水对库岸边坡稳定性影响具有一定规律<sup>[4-7]</sup>, 而基于库水作用下库岸岩土体物理力学性质变化对库岸稳定性影响的研究相对较少。事实上, 室内试验和现场试验结果都表明了库岸岩土体具有一定的水敏性, 干燥后内摩擦角和粘聚力均会下降, 从而导致岩土体抗剪强度降低<sup>[8-10]</sup>。研究表明<sup>[11-16]</sup>: 库岸土体颗粒细小、孔隙度大时, 容易产生范围较大的库岸失稳; 库岸为物理力学性质较好的粘性土以及沉积岩风化形成的残坡积土体时, 库岸失稳的宽度相对较小; 水库水位的反复升降会导致

库岸岩土体物理力学参数劣化, 并使库岸边坡稳定性具有时变演变规律, 等等。因此, 针对不同岩土体的复杂性, 研究库水浸泡及水位反复升降条件下岩土体特性变化对库岸边坡稳定性的影响, 对深入认识不同岩土体库岸边坡失稳机理有重要意义。

云南部分水库区域地表浅部部分或全部由红土构成, 不少水库存在库岸边坡失稳隐患。库岸边坡失稳不仅会对水工建筑物、金属结构等造成重大危害, 甚至会对下游人民群众的生命财产安全构成严重威胁。云南红土由于其物质组成和形成条件有别于其他地区土体, 因此其物理力学特性对库水作用下红土型库岸的稳定性有着显著影响。因此, 本文以云南红土型库岸为研究对象, 考虑红土型库岸在水位反复升降作用下红土物理力学特性变化的实际情况, 以干湿循环试验、土工试验为基础, 综合极限平衡法、数值计算以及理论分析, 研究在水库蓄水和水位反复升降形成的干湿循环作用下红土物理力学

收稿日期(Received date): 2017 - 12 - 07; 改回日期(Accepted date): 2018 - 03 - 16

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金地区基金项目(51269006; 51568031)。[Region Program of National Natural Science Foundation of China (51269006; 51568031).]

作者简介(Biography): 张祖莲(1964 -), 女, 副教授, 主要从事岩土工程及水工结构工程研究。[ZHANG Zulian (1964 -), Female, associate professor, mainly engaged in the research of geotechnical engineering and hydraulic structure engineering.] E-mail: zhangzulian@2008.sina.com

特性变化与库岸稳定性的内在联系,为进一步研究云南红土型库岸边坡失稳机理提供理论依据。

## 1 试验方法

### 1.1 试验土料

野外采集红土试样,经晾晒、过筛,并清除小石粒等杂质后,按《土工试验规程》<sup>[17]</sup>进行土工试验,其结果如表1所示。

表1 试验土样基本特性

Tab.1 Properties of the test laterite

比重 $G_s$	最优含	最大干密度	颗粒质量分数/%		
	水率 $\omega_{op}/\%$	$\rho_{dmax}/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	粘粒 <0.005 mm	粉粒 0.005 ~ 0.075 mm	砂粒 >0.075 mm
2.71	26.5	1.40	54.8	42.8	2.4

### 1.2 试验制样

根据试验用土基本特性,结合试验工况条件,配制满足一定含水率的土样。将配置好的试样土样装入环刀,分层击实,以达到试验所需的干密度。为防止试验土样在浸泡过程中变形破坏,用滤纸覆盖土样表面后再用透水石压盖,最后用绳紧扎。为保证试验结果具有可比性,所有试验土样一次制作完成。

### 1.3 试验过程

为模拟水库蓄水及水位反复升降引起的库岸边坡土体的干湿循环作用,进而研究水库蓄水及水位反复升降对库岸边坡稳定性的影响,在分析研究过程中,采用浸泡-风干的干湿循环试验,将试验土样的一次浸泡-风干过程视为一次干湿循环过程,将一次干湿循环过程模拟为水库水位的一次上升-蓄水-下降过程。具体试验步骤为:1)每个试样浸泡之前都称其质量,然后将试样置于水中直至完全淹没,试样浸泡时间长达24h。2)将浸泡结束后的试验土样脱湿风干。在风干过程中随时称量试样质量,当试样质量与浸泡前的初始质量相差在0.1%以内,认为试验土样完成了一次干湿循环过程。3)将脱湿风干试样进行相关土工试验,以测试相应条件下红土的颗粒组成、干密度。采用直剪试验,研究不同干密度和不同干湿循环条件下的红土粘聚力、内摩擦角以及抗剪强度。

为模拟库岸边坡土体物理力学特性随干湿循环过程的变化,拟定的试验工况和试样组数如下:1)干湿循环次数分别为1,2,3,4,5,6,8,10,12,15次共10个工况。2)每个工况均采用3个土样研究粘

粒、粉粒、干密度随干湿循环次数的变化,试验结果用3个土样试验结果的平均值。3)每个试验工况采用2个大组、每个大组采用4个土样分别对应竖向压力100,200,300,400 Kpa进行直剪切试验,以研究粘聚力、内摩擦角和抗剪强度随干湿循环次数的变化,最后将2大组结果求平均值得到均值粘聚力、均值内摩擦角和抗剪强度。

针对一定初始干密度,所需土样一次制作完成,然后依次针对不同干湿循环条件进行试验。由于土样表面的滤纸具有吸附性,在干湿循环过程中会带走试样表面的一些土颗粒,因此,为降低滤纸带来的误差扰动,相关测试均取样于对应试验条件下的红土试样内部。

## 2 结果与分析

干湿循环作用实际上包含两个过程,即浸泡吸水过程和风干脱水过程。在浸泡吸水过程中,大量水分侵入土体,其结果是土体含水量增加,引起土体膨胀,从而改变红土的颗粒结构和孔隙结构,且水分将溶解和带走部分氧化物胶体。在风干脱水过程中,水分蒸发,引起土体收缩,在土体间形成较大的孔隙,部分氧化物由胶结态转化为结晶态,且这种转化是不可逆的。在干湿循环过程中,水分反复浸入和浸出土体,导致红土颗粒间孔隙结构的变化,进而引起红土物理力学特性发生改变。

### 2.1 干湿循环作用下红土物理力学特性的变化

#### 2.1.1 干湿循环作用下红土颗粒组成的变化

针对初始颗粒组成为粘粒54.8%、粉粒42.8%、砂粒2.4%的红土,在初始干密度分别为1.2,1.3,1.4  $g/cm^3$ 的条件下进行干湿循环试验,研究干湿循环作用对红土颗粒组成的影响。由于试验土样的砂粒含量较小,且在干湿循环试验过程中变化不大,因此,主要研究干湿循环作用引起的红土颗粒组成中粘粒和粉粒的变化。

图1和图2表明:在一定初始干密度条件下,粘粒和粉粒含量随干湿循环次数的变化整体上呈3个阶段。在干湿循环初始阶段,即在干湿循环约2次内,试验红土粘粒含量随干湿循环次数的增加而增加,粉粒含量则随之减少,而砂粒含量几乎不变<sup>[18]</sup>。当红土试样的干湿循环次数超过两次后,粘粒开始随干湿循环次数的增加而减少,而粉粒相对增加。在干湿循环大约10次后,粘粒、粉粒随干湿循环次数的变化基本趋于稳定。其原因是:一次干湿循环

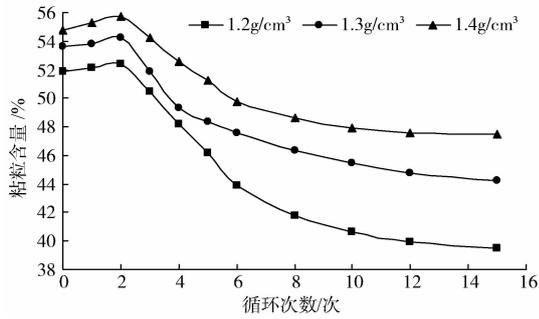


图 1 红土试样粘粒含量与干湿循环次数的关系

Fig. 1 Relationship between content of lay particles in sample and wetting-drying cycles

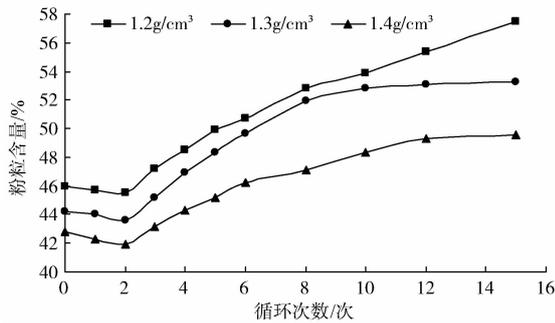


图 2 红土试样粉粒含量与干湿循环次数的关系

Fig. 2 Relationship between powder particles in sample and wetting-drying cycles

包括 2 个过程,即浸泡吸水过程和风干脱水过程。红土中因氧化铁、氧化铝、二氧化硅等胶结物质的存在,使红土具有团粒结构,其中游离氧化铁的胶结作用尤为重要。浸泡过程使得红土试样吸水膨胀,孔隙增大,导致细小颗粒在红土试样中发生迁移,也使部分氧化物胶体溶解而流失。风干过程则导致红土试样失水收缩,部分氧化物由胶结态转化为结晶态。在干湿循环过程中,红土试样反复浸泡-风干,正如文献[8]所指出的:此时红土中的游离氧化铁是以结晶态(针铁矿)和胶结态的状态共存的,且红土中的结晶态游离氧化铁具有干燥不可逆性。在土样脱湿风干后再次浸泡,虽然土体的含水率提高了,但其中结晶态的游离氧化铁并不能转化为胶结态,而是以单颗粒或吸附于少量团粒表面的形式存在于土体当中。经过反复干湿循环后,因红土的胶结结构有限,导致红土中团粒结构有限,土体因结构遭到破坏而细小颗粒增多。另一方面,在土样开始浸泡时,试验土样含水率随浸泡时间的延长而增大,导致土体颗粒间的孔隙逐渐被水充填,从而在土体中形成了大小不同的渗流,因而表面的粘粒被带入到试验土样内部,导致了粘粒的增加。多次干湿循环后,土体

反复吸水膨胀,脱水收缩,其结构不断遭受破坏,粒径较大的颗粒逐渐分解成粒径较小的颗粒,同时土体产生的裂隙数量增多,裂隙宽度增大,在渗流作用下细小的粘粒不断被带出土体,其结果导致了粉粒含量的相对增加和粘粒含量的相对减少,当土体结构达到新的平衡状态后,土体颗粒组成逐渐趋于稳定。

图 3 和图 4 表明:在干湿循环次数一定的条件下,粘粒含量随初始干密度的增加而增加,粉粒含量随初始干密度的增加而减少。这是因为:干密度大小反映了土壤孔隙大小和数目,而土壤孔隙大小和数目的不同,又直接影响到浸泡过程中水的入渗。干密度越小,则土壤中孔隙越多,在浸泡过程中单位时间内通过土壤孔隙的渗水就越多;反之,干密度越大,则土体越密实,土颗粒间的孔隙越少,在浸泡过程中,水体入渗越困难。因此在相同干湿循环次数条件下,初始干密度越大,随渗流迁移的细小颗粒相对较少,试验土样的粘粒含量相对较大,而粉粒含量相对较少。

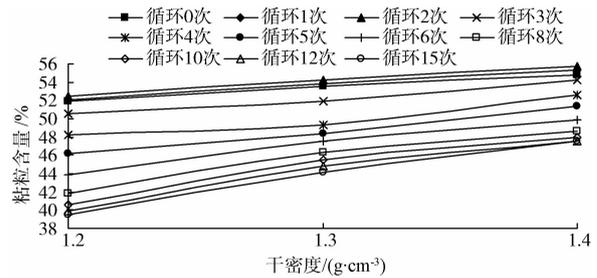


图 3 红土试样粘粒含量与干密度的关系

Fig. 3 Relationship between content of lay particles in sample and dry density

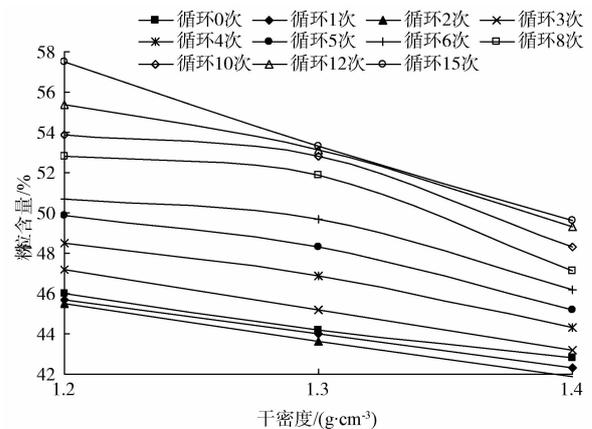


图 4 红土试样粉粒含量与干密度的关系

Fig. 4 Relationship between content of powder particles in sample and dry density

### 2.1.2 干湿循环作用下红土干密度的变化

图 5 表明:一方面,当干密度一定时,在 1 次干湿循环条件下,红土试样的干密度显著增加;然后在 2~6 次干湿循环范围内,干密度随干湿循环次数的变化略有增加,但增加幅度很小;当干湿循环达 6 次后,干密度几乎不再随干湿循环次数的增加而变化,即干密度逐渐趋于稳定。另一方面,初始干密度越大,经过相同干湿循环次数后,土体干密度也越大。这是因为:试验土样在初次干湿循环时,静水压力的作用既压实土颗粒又分散土颗粒,而且水分沿着孔隙进入土样,导致试样表面的粘粒在水的作用下被带入到土样内部,粘粒充填了土样内部的部分孔隙,使得土样有变密实的趋势,所以土样干密度随干湿循环作用呈逐渐上升的变化趋势。持续的干湿循环作用一方面使得土样结构不断损伤,另一方面水对土体结构的破坏也逐渐趋于稳定,试样土样结构达到新的平衡状态。因此经过一定的干湿循环作用后,土样干密度因土体结构达到新的平衡状态而趋于稳定。

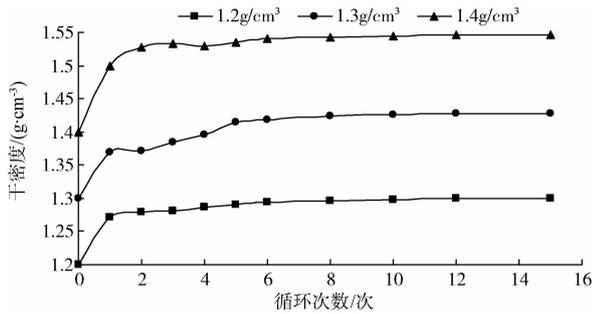


图 5 红土试样干密度与干湿循环次数的关系  
Fig. 5 Relationship between dry density in sample and wetting-drying cycles

### 2.2 干湿循环作用下红土粘聚力、内摩擦角及抗剪强度的变化

干湿循环作用之所以改变了红土的颗粒组成和干密度,其原因在于干湿循环作用导致的红土结构的变化,而红土结构的变化必然引起其粘聚力、内摩擦角以及抗剪强度的变化。

#### 2.2.1 干湿循环作用下红土粘聚力随干湿循环次数的变化

图 6 是一定初始干密度的试验红土土样粘聚力随干湿循环次数的变化过程,即在干湿循环次数一定范围内,随干湿循环次数的增多,试验红土粘聚力随干湿循环次数的增加总体上成非线性减小的变化趋势,特别是在前 6 次干湿循环范围内,粘聚力随干湿循环次数的增加下降幅度相对较大,且下降过程

有一定的起伏。当干湿循环次数达约 10 次以后,粘聚力趋于稳定,即粘聚力几乎不再随干湿循环次数的增加而变化。其原因在于:土体粘聚力与土体结构和土颗粒之间的物理化学胶结力、分子引力以及基质吸力密切相关,而红土中铁、铝游离氧化物的胶结作用尤其重要。干湿循环的浸泡过程不仅使红土中的游离氧化物胶体不断溶解于水,还会使试验土样中的含水率增加而基质吸力变小;浸入土体的水分既破坏了土颗粒表面的双电层结构,又不断削弱土粒间的连接力,其结果是红土结构的不断疏松。脱湿风干过程又使部分游离氧化物胶体由胶结态转化为结晶态,导致胶结作用所形成的粘聚力减小。反复的干湿循环作用使得红土颗粒间的胶结作用不断弱化,土体的反复膨胀和收缩使得红土试样裂缝发育,土体破碎松散,细小颗粒在干湿循环作用下不断迁移,土颗粒之间的间距逐渐增大,颗粒之间的引力不断减弱,土体孔隙比变大,土粒结合水膜连接作用减弱甚至消失,宏观上就表现为粘聚力下降。当一定次数干湿循环后,试验土样的裂隙、结构趋于稳定,粘聚力的衰减也就趋于稳定。

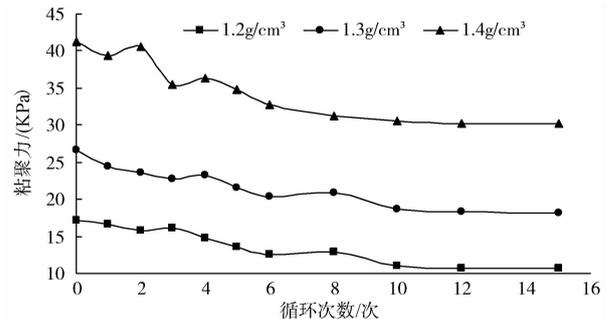


图 6 红土试样粘聚力与干湿循环次数的关系  
Fig. 6 Relationship between cohesion in sample and wetting-drying cycles

#### 2.2.2 干湿循环作用下红土内摩擦角随干湿循环次数的变化

图 7 是一定初始干密度的试验红土土样内摩擦

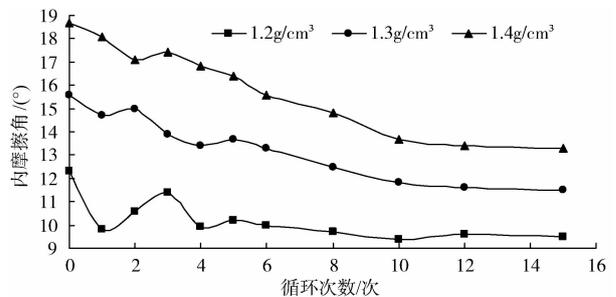


图 7 红土试样内摩擦角与干湿循环次数的关系  
Fig. 7 Relationship between internal friction angle in sample and wetting-drying cycles

角随干湿循环次数的变化过程,即在干湿循环次数一定范围内,随干湿循环次数的增多,红土内摩擦角总体上随循环次数的增加而成非线性衰减的变化趋势,尤其在干湿循环前6次内,内摩擦角随干湿循环次数的增加下降较为明显,但变化过程有一定的起伏。当干湿循环次数达约10次后,内摩擦角趋于稳定,即内摩擦角几乎不再随干湿循环次数的增加而变化。这是因为:内摩擦角的大小与土体的颗粒形态、颗粒排列形式、孔隙形态以及颗粒接触关系密切相关,因为这些因素决定了土颗粒之间的摩擦力和咬合力。干湿循环导致土体结构发生变化,使得颗粒大小、形状发生改变,颗粒重新排列,颗粒之间的连接形式也发生较大变化,并引起红土中水分和孔隙通道分布也发生了较大变化。对红土而言,因游离氧化物的胶结作用而使得红土具有一定团粒结构,这种土体颗粒结构状态必将影响到红土的内摩擦角。干湿循环的浸泡吸水过程使得部分游离氧化物胶体溶解于水中,而脱湿风干过程又使得红土中部分游离氧化铁由于干燥作用由胶结态转化为结晶态,并以单颗粒或吸附于少量团粒表面的形式存在于土体当中<sup>[8]</sup>。因此,经过干湿循环后,红土中的氧化物胶体以胶结态和结晶态并存的形式存在。胶结态的游离氧化物使红土形成团粒结构,与单颗粒结构相比,团粒结构的形状和体积都发生了较大的变化;而结晶态的游离氧化物则在颗粒表面形成“包膜”,这些虽然可在一定程度上增加红土颗粒表面的粗糙度,使颗粒间摩擦力有增大的趋势,但随着干湿循环次数的增加,游离氧化物一方面不断流失,另一方面又不断由胶结态转化为结晶态,导致团粒结构不断遭到破坏,且团粒结构在水体的润滑作用下孔隙结构逐渐增大,红土颗粒间间距也随之加大,导致颗粒间的咬合力和摩擦力不断减小,其结果是红土内摩擦角随干湿循环次数的变化总体上呈下降的趋势。在反复干湿循环作用下,红土颗粒的形态、排列形式和接触关系等不断变化,随着干湿循环作用对红土结构的损伤逐渐减小,红土形成了相对稳定的新结构,宏观表现为内摩擦角逐渐趋于稳定。

### 2.2.3 干湿循环次数一定时红土粘聚力和内摩擦角随初始干密度的变化

图8和图9表明:在干湿循环次数一定的条件下,试验红土粘聚力和内摩擦角均随初始干密度的增加而增加。这是因为:随着干密度的增大,红土的孔隙比减小,颗粒之间的距离也随之减小,这有利于增强颗粒间结合水和毛细水的连接作用,且游离氧

化物的胶结作用也有增强的趋势。所以,在一定干湿循环作用下,干密度的增大会导致红土粘聚力的增大。土体细颗粒含量随干密度的增大而增大,土体细颗粒含量越多,则土粒之间的接触点增多,且联结越紧密,土颗粒之间也相互交错,土颗粒之间的接触由点接触转化为面接触,颗粒之间摩擦力增大;且细颗粒的增多也使得颗粒之间相互交错咬合,从而增强了颗粒之间的咬合力,这两方面的共同作用都将导致红土内摩擦角的相应增大。

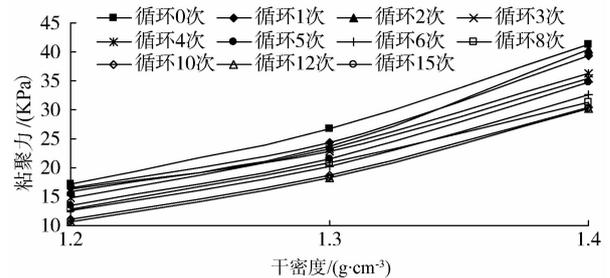


图8 红土试样粘聚力与干密度的关系

Fig. 8 Relationship between cohesion in sample and dry density

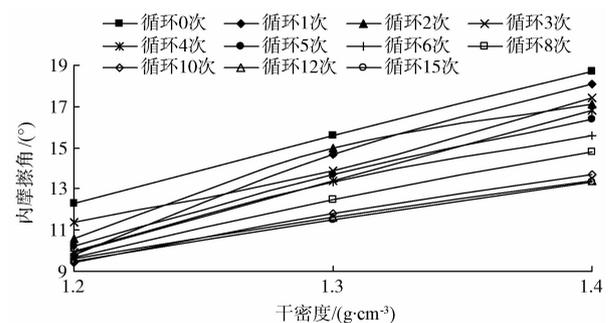


图9 红土试样内摩擦角与干密度的关系

Fig. 9 Relationship between internal friction angle in sample and dry density

### 2.2.4 干湿循环作用下红土抗剪强度随干湿循环次数的变化

图10表明:在一定初始干密度条件下,干湿循环作用导致红土抗剪强度随干湿循环次数的增加而呈非线性减小的变化趋势,即干湿循环作用对红土抗剪强度的衰减是非常明显的。在干湿循环6次范围内,红土抗剪强度随干湿循环次数的增加下降幅度较快,在干湿循环6~10次范围内,红土抗剪强度随干湿循环次数的增加下降幅度变小,当干湿循环次数超过10次后,红土抗剪强度随干湿循环次数的变化趋于稳定。其原因在于:在干湿循环过程中,红土浸泡时吸水膨胀,体积增加,而风干脱水时体积收缩。土体反复的膨胀和收缩,再加上浸泡和风干过

程中胶结结构的溶解和转化,这几方面共同作用导致的土样裂隙使得水分入渗,这既破坏了土颗粒间的结构键力,又引起红土结构的破坏松散,导致土体抗剪强度也逐渐降低。干湿循环过程引起土体结构的损伤,使得土体的孔隙比和颗粒间距离也逐渐变大,直接导致粘聚力和内摩擦角的衰减,从而降低土体抗剪强度。当经历一定次数的干湿循环后,由于水对红土结构的损伤破坏能力有限,红土结构逐渐达到新的平衡状态,因而红土的抗剪强度也逐渐接近于某一稳定值。

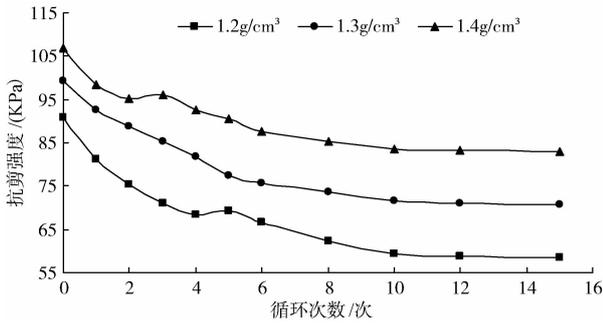


图 10 红土试样抗剪强度与干湿循环次数的关系  
Fig. 10 Relationship between Shear strength in sample and wetting-drying cycles

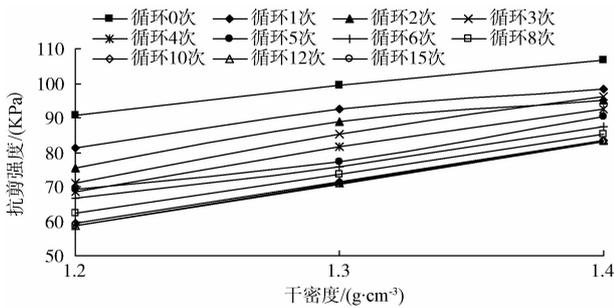


图 11 红土试样抗剪强度与干密度的关系  
Fig. 11 Relationship between Shear strength in sample and dry density

图 11 表明:在一定干湿循环条件下,红土初始干密度越大,红土抗剪强度也越大。其原因在于:红土的初始干密度越大,红土结构越密实,土颗粒之间的胶结作用、结构键力、咬合力、摩擦力等都得到增强,颗粒之间相互错动越困难,因此在一定干湿循环条件下,其抗剪强度也越大。

### 2.3 红土型库岸稳定安全系数随干湿循环次数的变化

运用 GeoStudio 数值仿真软件建立模型,模拟库水位上升、蓄水、下降三种工况,但不考虑地震、降雨及其他作用条件。库岸稳定性分析计算模型如图

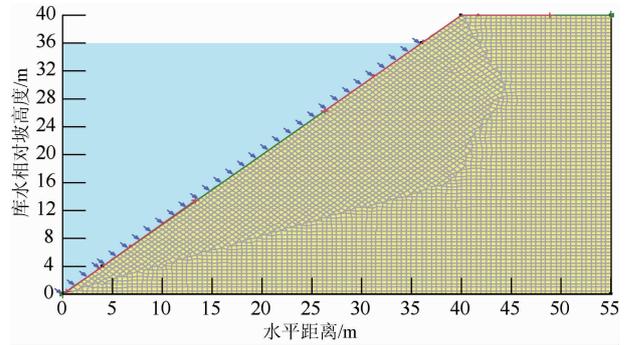


图 12 库岸稳定性分析计算模型  
Fig. 12 Model of slope stability analysis

12 所示,岸坡面为变水头边界,通过介质运移模拟库水位升降过程。

将一次水库水位的上升、蓄水、下降作为一次干湿循环过程,针对一定红土型库岸进行库岸边坡稳定分析的数值计算。在计算分析过程中首先运用 GeoStudio 中的 SEEP/W 渗流模块对库岸边坡进行渗流分析,且在水位未上升时的初始状态采用稳态渗流分析,库水位上升、下降阶段采用瞬态渗流分析。采用 Van Genuchten<sup>[19]</sup>提出的关于基质吸力的经验公式计算基质吸力,进而计算库岸边坡在所有外荷载作用下的应力场,最后结合干湿循环试验所得的红土抗剪强度及抗剪强度指标随干湿循环次数的变化,用 SLOPE/W 模块进行一定库岸边坡的稳定分析。计算得出库岸边坡稳定安全系数随干湿循环次数及干密度的变化如图 13 和图 14 所示。

图 13 表明:在一定初始干密度条件下,红土型库岸边坡稳定安全系数随干湿循环次数的增加而减小,且在前 6 次干湿循环内稳定安全系数降低幅度较大,6 ~ 10 次干湿循环内库岸边坡稳定安全系数随干湿循环次数的增加而减小的幅度变小,当干湿循环达到约 10 次后,红土型库岸边坡稳定安全系数

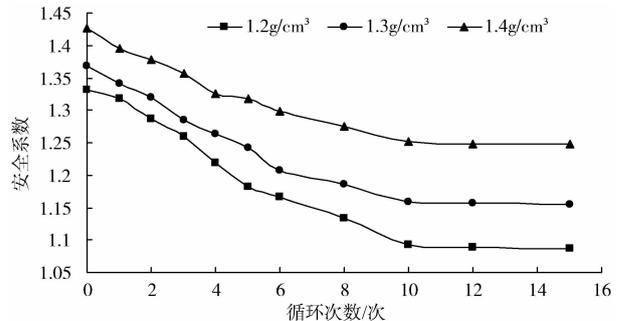


图 13 库岸边坡稳定安全系数与干湿循环次数的关系  
Fig. 13 Relationship between safety factor of slope stability and wetting-drying cycles

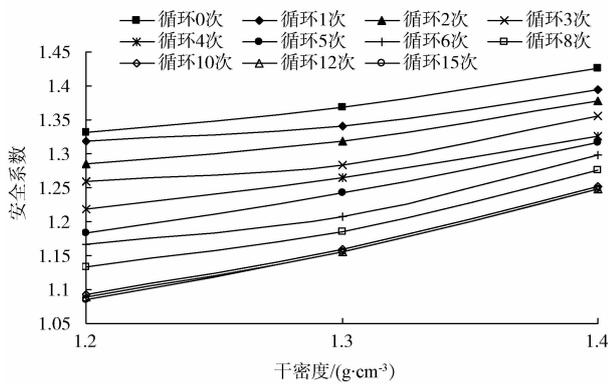


图 14 库岸边坡稳定安全系数与干密度的关系

Fig. 14 Relationship between safety factor of slope stability and dry density

几乎不再随干湿循环次数的增加而变化,因此可基本认为云南红土型库岸边坡在经历约 10 次干湿循环后库岸红土将达到新的平衡状态,可将第 10 次干湿循环后的云南红土型库岸边坡稳定安全系数作为设计施工的依据。

图 14 表明:在其他条件相同和相同循环次数条件下,库岸边坡红土初始干密度越大,其稳定安全系数也越大,即库岸的稳定性越好。

图 13、14 所呈现的红土型库岸边坡稳定安全系数随干湿循环次数的变化过程和趋势与抗剪强度随干湿循环次数的变化过程和趋势一致,说明库岸边坡稳定性与土体抗剪强度密切相关。水库蓄水及库水位反复升降引起的干湿循环作用,导致库岸红土含水率及结构不断发生变化,其结果是库岸红土粘聚力、内摩擦角不断衰减,而红土抗剪强度大小又决定于粘聚力和内摩擦角,因此,干湿循环次数的增多破坏了红土结构导致其抗剪强度降低。在一定库岸边坡体系和受力条件下,土体抗剪强度降低会导致边坡抗滑能力下降,从而降低红土型库岸边坡稳定安全系数。在实际工程中,针对不同土体、不同干密度的库岸,应关注干湿循环对库岸土体的劣化作用,并采取相应措施提高库岸土体抗剪强度及干密度,以增强库岸边坡稳定性。

### 3 结论

通过干湿循环试验及土工试验,分析研究了干湿循环作用对云南红土颗粒组成、干密度、粘聚力、内摩擦角以及抗剪强度的影响,进而研究了红土型库岸边坡稳定安全系数随干湿循环过程的变化规律,得出以下结论:

1)在一定初始干密度条件下,红土的粘粒含量在干湿循环 2 次范围内明显增加,随后粘粒含量随干湿循环次数的增加逐渐减少,在干湿循环次数约 10 次后,粘粒含量随干湿循环次数的变化趋于稳定。相应地,红土试样中粉粒的变化过程与粘粒相反,即粘粒增加时,粉粒减少,但在干湿循环次数约 10 次后,粉粒含量也趋于稳定,不再随干湿循环次数的变化而变化。

2)在一定初始干密度条件下,红土干密度在约 6 次干湿循环范围内随干湿循环次数的增加而增加,且在干湿循环约 2 次范围内增加幅度较大,干湿循环约 6 次后,红土干密度随干湿循环次数的变化趋于稳定。

3)红土粘聚力、内摩擦角及抗剪强度均随干湿循环次数的增加而逐渐衰减,且在约 6 次干湿循环次数内衰减幅度较大;当干湿循环约 10 次后土体结构重新达到平衡,粘聚力、内摩擦角及抗剪强度也趋于稳定。

4)在干湿循环约 10 次范围内,红土型库岸边坡稳定安全系数随干湿循环次数的增加而减小,但在干湿循环次数达 10 次后,库岸稳定安全系数随干湿循环次数的变化趋于稳定。可以预测:当干湿循环达到约 10 次后,也即水库水位升降达到一定次数后,因红土土体结构趋于稳定,则红土型库岸边坡稳定性也逐渐趋于稳定。

由于本次试验研究采用的干湿循环次数仅为 1,2,3,4,5,6,8,10,12,15 次共 10 种工况,总体来看,周期较短,对红土型库岸边坡的实际情况模拟不足,再加上实际工程中库岸岩土体物理力学特性及库岸边坡稳定性受多种因素的影响,因此,针对不同水库运行工况和水文地质条件,要得到干湿循环作用下红土型库岸土体物理力学性质及库岸稳定性的变化规律,仍有待于长期对干湿循环影响的研究和实际工程的观测研究。

### 参考文献 (References)

- [1] 陈晓平. 基于滑带土强度特性的水库蓄水诱发滑坡研究综述 [J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(3): 77-83 [CHEN Xiaoping. Overview of landslides due to reservoir impoundment based on shear strength properties of sliding zone soils [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(3): 77-83]
- [2] 宋丹青, 王丰, 梅明星, 等. 水库蓄水对库岸边坡稳定性的影响 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 60-64 [SONG Danqing, WANG Feng, MEI Mingxing, et al. Study on influence of water impounding on reservoir landslide [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2016, 37(1): 60-64]

- [3] 王小敏. 库水位骤降情况下均质库岸边坡稳定性分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2012, **29**(1): 110 - 113 [WANG Xiaomin. Stability analysis of homogeneous reservoir bank under drawdown condition [J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2012, **29**(1): 110 - 113]
- [4] FUJITA T, NGUYEN T, HERNELIND J, et al. Hydromechanical response of a fractured granitic rock mass to excavation of a test pit—the kamaishi mine experiment in Japan [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, **38**(1): 79 - 94]
- [5] 徐平, 李同录, 李萍. 考虑非饱和渗流作用下三峡库岸滑坡稳定性研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, **21**(1): 7 - 12 [XU Ping, LI Tonglu, LI Ping. Stability study on Majiagou landslide in three gorges reservoir area with consideration of unsaturated seepage [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, **21**(1): 7 - 12]
- [6] 左良栋, 周世良, 吴飞桥, 等. 水位变化对库区某岩质边坡的稳定性影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, **6**(2): 429 - 435 [Zuo Liangdong, Zhou Shiliang, Wu Feiqiao, et al. Research on the stability of a rock slope in the three gorges reservoir influenced by reservoir flow [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, **6**(2): 429 - 435]
- [7] 王明华, 晏鄂川. 水库蓄水对岸坡滑坡的影响研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(12): 2722 - 2725 [WANG Minghua, YAN Echuan. Study of influence of reservoir water impounding on reservoir landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(12): 2722 - 2725]
- [8] 王中文, 洪宝宁, 刘鑫, 等. 红粘土抗剪强度的水敏性研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, **43**(1): 17 - 22 [WANG Zhongwen, HONG Baoning, LIU Xin, et al. Ater-sensitive properties of shear strength of red clay [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition). 2011, **43**(1): 17 - 22]
- [9] 刘新荣, 傅晏, 王永新, 等. (库)水-岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **30**(9): 1298 - 1302 [LIU Xinrong, FU Yan, WANG Yongxin, et al. Deterioration rulers of shear strength of sand rock under water-rock interaction of reservoir [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **30**(9): 1298 - 1302]
- [10] WEN B P, AYDIN A, DUZGOREN-AYDIN N S, et al. Residual strength of slip zones of large landslides in the Three Georges area, China [J]. Engineering Geology, 2007, **93**: 82 - 98
- [11] 王浩, 夏立权. 涉水库岸稳定性影响因素及敏感性分析[J]. 岩土工程技术, 2009, **23**(6): 296 - 300 [WANG Hao, XIA Liqun. Influence factors and sensitivity analysis of stability for bank involved in water [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2009, **23**(6): 296 - 300]
- [12] 张明, 胡瑞林, 崔芳鹏. 考虑水-岩物理化学作用的库岸堆积体边坡稳定性研究—以金沙江下咱日堆积体为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增刊2): 3699 - 3704 [ZHANG Ming, HU Ruilin, CUI Fangpeng. Stability study of reservoir accumulation body considering physical and chemical reactions between water and accumulation body-taking Xiazanri accumulation body for example [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(Supp. 2): 3699 - 3704]
- [13] 刘新荣, 傅晏, 王永新, 等. 水-岩相互作用对库岸边坡稳定的影响研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(3): 613 - 616 [LIU Xinrong, FU Yan, WANG Yongxin, et al. Stability of reservoir bank slope under water-rock interaction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(3): 613 - 616]
- [14] 周世良, 刘小强, 尚明芳, 等. 基于水-岩相互作用的泥岩库岸时变稳定性分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(7): 1933 - 1939 [ZHOU Shiliang, LIU Xiaoqiang, SHANG Mingfang, et al. Time-varying stability analysis of mudstone reservoir bank based on water-rock interaction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(7): 1933 - 1939]
- [15] 李典庆, 吴帅兵. 考虑时间效应的滑坡风险评估和管理[J]. 岩土力学, 2006, **27**(12): 2239 - 2249 [LI Dianqing, WU Shuaibing. Landslide risk assessment and management considering time effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(12): 2239 - 2249]
- [16] 刘才华, 陈从新, 冯夏庭, 等. 地下水对库岸边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2005, **26**(3): 419 - 422 [LIU Caihua, CHEN Congxin, FENG Xiating, et al. Effect of groundwater on stability of slopes at reservoir bank [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(3): 419 - 422]
- [17] 南京水利科学研究所主编. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 水利水电出版社, 2000 [Nanjing water conservancy science research institute. SL237-1999 Geotechnical Test Procedure [S]. Beijing: Water conservancy and Hydropower Publishing House, 2000]
- [18] 梁谏杰. 云南红土型库岸稳定性研究[D]. 2017, 昆明理工大学 [LIANG Jianjie. Study on stability of Yunnan laterite bank [D]. 2017, Kunming University of Science and Technology]
- [19] Van genuchten MT. A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(5): 892 - 898.

## On the Relationship between Characteristics of Yunnan Laterite and Stability of the Bank Slope under Wetting-Drying Cycles

ZHANG Zulian, LIANG Jianjie, HUANG Ying, QIU Guangui, YUAN Qiang

(*College of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China*)

**Abstract:** This is of great significance in understanding the instability mechanism of bank slopes composed of different types of rocks and soils. The characteristics of Yunnan laterite soil subjected to dry-wet cycles with its influence on the stability of bank slope were studied by experimental tests. The influence of the immersion and fluctuation level of reservoir water was studied through geotechnical tests. Analytical deduction and numerical simulation were also combined in the study. Results showed that, with a fixed initial dry density, the content of clay particles in laterite first increased with the number of wet-dry cycles and then decreased before reaching to a stable value as the cycles increased. At the same time, the cohesion, internal friction angle and shear strength of laterite all decreased first nonlinearly with the increase of the cycling times, and then became stable after round 10 wetting-drying cycles. The shear strength, cohesion and internal friction angle of laterite presented a significant effect on the stability of laterite bank slope. This research could provide reference for preventing and controlling the slope failure of Yunnan lateritic reservoir bank in engineering practice.

**Key words:** laterite; cohesion; internal friction angle; shear strength; stability safety factor